DOI:10.11931/guihaia.gxzw201811012

干热河谷石漠化区火龙果地不同耕作方式的土壤矿质元素特征

钟欣平[1]，喻阳华[2*]，杨丹丽[1]，侯堂春[1]
（1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院，贵阳 550025；2. 贵州师范大学 喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心，贵阳 550001）

摘 要：探讨不同耕作方式的土壤矿质元素含量变化特征，旨在促进火龙果生长发育和品质改良。研究区采用套种紫花苜蓿（*Medicago sativa*）、施用有机肥、施用化肥与农药、地膜覆盖和无措施 5 种耕作方式，以每种方式土壤的 22 种矿质元素为评价指标，比较不同耕作方式的矿质元素含量差异，阐明土壤矿质元素之间的相关关系。结果表明：与无措施相比，其他耕作方式的 Ca、Si、Mn 等元素含量呈增加趋势，Fe、Mg、Al 等元素含量则降低，Na 含量无显著差异；施用有机肥的矿质元素含量最丰富，地膜覆盖次之，套种紫花苜蓿最低；相关性分析表明火龙果地土壤矿质元素间多存在显著相关性，Al、Si、S、Ni 与其他元素的相关性较密切，其次为 Fe、Mg、Na、Mn、Cu、Co，均达到显著或极显著水平；Ca、Fe、Mg、Mn、Cu、Zn 和 B 之间多呈负相关，存在拮抗效应。干热河谷石漠化区在火龙果栽培时，应首选有机肥作为养分添加方式；并及时补充不同耕作方式造成的土壤矿质养分亏缺，尤其是 Fe、Mg、Al、Na、Cu、Zn 等元素。

关键词：耕作方式，土壤矿质元素，火龙果，干热河谷石漠化区

中图分类号： S158.3　　　**文献标识码：**A

Characteristics of soil mineral elements in different tillage methods of pitaya in dry-hot valley rocky desertification region

ZHONG Xinping[1]，YU Yanghua[2*]，YANG Danli[1]，HOU Tangchun[1]
（1. *School of Geography and Environmental Science* , *Guizhou Normal University* , Guiyang 550025 , China ; 2 . *School of Karst Science/State Engineering Technology Institute for Karst Decertification Control*, *Guizhou Normal University* , Guiyang 550001, China）

Abstract: The purpose of this study is to investigate the characteristics of soil mineral elements in different tillage methods were discussed in order to promote growth, development and quality improvement of pitaya. The evaluating indicator was conducted on 22 soil mineral elements in 5

基金项目：国家重点研发计划课题（2016YFC0502603）[Supported by the National Key R & D Program of China (2016YFC0502603)]。

作者简介：钟欣平（1997—），女，布依族，贵州都匀人，研究方向为土壤与植物营养，（E-mail）1657400378@qq.com。

***通信作者：**喻阳华，男，博士，副教授，研究方向为喀斯特环境保护与治理，（E-mail）yuyanghua2003@163.com。

tillage methods of pitaya land, the methods include interplant alfalfa (*Medicago sativa*), application of organic fertilizer, chemical fertilizer and pesticides, film mulching and no measures in study area, to compare the content differences of soil mineral elements in different tillage methods, correlation analysis was also performed to clarify the correlation between mineral elements in soil. It turned out that compared with no measures, the content of Ca, Si, Mn *et al* showed an increasing trend, while the content of Fe, Mg, A l *et al* decreased, and that the content of Na showed no significant difference; About the supplement of mineral elements, the organic fertilizers applied were most abundant, the second is plastic mulching, alfalfa is the worst; According to the correlation analysis, there are correlations among soil mineral elements. Al, Si, S, Ni were closely related to other elements, while is Fe, Mg, Na, Mn, Cu and Co, and significant or extremely significant correlation between elements. Besides, there is an extremely significant or significant negative correlation between Ca, Fe, Mg, Mn, Cu, Zn and B, antagonistic effect. When cultivated of pitaya in dry-hot valley rocky desertification region, the tillage method of applying organic fertilizer is the first choice for nutrient supplement. The deficiency of mineral elements caused by different farming methods should be timely supplemented, especially for Fe, Mg, Al, Na, Cu and Zn.

Key words: tillage methods, soil mineral element, pitaya, dry-hot valley rocky desertification region

火龙果具有防癌、抗氧化、增强免疫力等多种功效（Tenore et al., 2012）。它对高温干旱、贫瘠土壤的适应能力强（Lyman, 1982），且生长发育过程中对氮（N）、磷（P）、钾（K）等矿质元素需求差异大（王彬等, 2015）。矿质元素影响果实的生长发育（潘海发等, 2011），其含量水平决定了果实风味品质的形成（曹永庆等, 2015）。矿质元素供应平衡被打破，即 N、P、K、钙（Ca）、镁（Mg）甚至微量元素等供应失衡，对植物体的生长产生影响（毛庆功等, 2015）。

宋少华等（2016）研究甜柿果实矿质元素与品质指标，表明适宜的矿质元素含量与计量比可显著提高甜柿的品质和产量。杨道富等（2012）测定与分析白肉火龙果果实生长中矿质元素的动态变化，表明火龙果在不同生长时期对矿质元素的需求量各异。黄霄等（2018）研究‘白玉’枇杷果实品质与矿质元素含量的相关关系，表明矿质元素含量显著影响果实品质。不同的耕作方式在一定程度上改变了矿质元素的含量，刘群龙等（2015）研究叶面喷硒对梨果实矿质元素的影响，表明施用外源硒可显著提高果实硒（Se）、铁（Fe）和铜（Cu）的含量，但 Cu 的增加将抑制植物的生长（Xiong et al., 2006）。秦红灵等（2007）和李玉洁等（2015）研究耕作方式对土壤理化性状的影响，表明覆盖牛粪及免耕提高了根部土壤营养元素含量，且覆盖处理有助于营养物质的分解和转化（Brennan et al., 2011）。孙萌等（2017）研究地面覆盖的土壤微域生态效应，表明核桃园地面覆盖牛粪可显著提高土壤矿质元素含量，而覆盖苜蓿效果较差。综上，矿质元素可影响作物的品质和产量，研究耕作方式对土壤矿质元素的影响规律，有利于作物生长发育和品质形成。

目前，关于干热河谷石漠化区矿质元素的研究主要集中在土壤养分（岳学文等, 2016；闫帮国等, 2016）、植物叶片元素含量（李艳梅等, 2016）等方面，而对中量、微量等土壤矿质元素的报道较为鲜见（喻阳华等, 2018）。因此，本文以干热河谷石漠化区为背景，通过测定火龙果地不同耕作方式的土壤矿质元素含量，阐明火龙果地土壤矿质元素含量随耕作方式的变化特征，以期为改善该区土壤矿质元素含量，提高火龙果产量与品质提供科学依据。

1　材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于关岭县花江镇峡谷村（105°38′48.48″E，25°39′35.64″N），生境具有明显的独特性。气候类型主要为中亚热带季风湿润气候，光热资源丰富，冬春温暖干旱，夏秋湿热。年均温 18.4 ℃，年均极端最高气温 32.4 ℃，年均极端最低气温 6.6 ℃，年均降水量 1 100 mm，降雨量集中分布在 5—10 月。区域内河谷深切，地下水深埋，最高海拔 1 473 m（胡家湾坡顶），最低海拔 370 m（三叉河）。森林覆盖率较低，基岩裸露率在 50%~80%之间，碳酸盐岩类岩石占 78.45%，土壤以石灰岩为成土母质的石灰土为主，地表破碎，多处于中度、重度石漠化等级。

1.2 样品采集与处理

研究区之前以种植玉米为主，2007 年从台湾引入大红 1 号火龙果。火龙果每年可采收 5~7 次，需肥量大，受当地畜禽养殖数量减少、农村劳动力外出、石山区耕作成本较高等因素影响，向土壤施用的有机肥逐年降低。伴随土壤矿质化过程，火龙果地土壤养分呈衰退趋势，加之使用化肥与农药，导致火龙果产量和品质降低。鉴于此，课题组于 2015 年 5 月开始，在火龙果栽培基地设置了套种紫花苜蓿（alfalfa，AF）、施用有机肥（organic fertilizer，OF）、地膜覆盖保墒（film mulching，FM）等水肥控制性试验，并于 2017 年火龙果采摘完毕后（11 月）采样测定。其中：套种紫花苜蓿是在距离火龙果母株 40~50 cm 周围分四穴播种，深度为 2~3 cm，株高 40~50 cm 时进行采收，留茬约 5 cm，持续时间为 2.5 a；有机肥由腐熟猪粪和油枯共同发酵制得，每株用量 2~3 kg，施于火龙果母株 0~60 cm 周围，持续时间为 2.5 a；地膜覆盖保墒是使用塑料薄膜将地面全部覆盖，防止土壤水分蒸发，抑制杂草，持续时间为 2.5 a；使用化肥与农药（chemical fertilizer and pesticides，CFP）是较为粗放的经营方式，持续时间约 10a，农户自行根据火龙果长势和病虫害发生情况，补充复合肥和喷洒农药；无措施（no measures，NM）的持续时间约 10 a，火龙果长势差，产量和养分吸收效率低。

样地地理坐标、海拔、坡度、坡向较为近似，降低了矿质元素的空间异质性。各样地大小为 10 m×10 m，每种方式设置 3 个平行。采样时，去除土体表面枯枝落叶后，使用铁铲挖掘土壤剖面后，采集表层 0~20 cm 的土样，采用“S”形 5 点混合采样，四分法取出 1 kg 左右土样，挑出杂物，装入塑料密封袋带回实验室，自然风干，研磨，过筛备用。

1.3 测定方法

硼（B）、砷（As）、Se 按照《区域地球化学勘查规范》（DZ/T0167-2006）（任天祥等，2006）进行测定，硅（Si）、Ca、Mg、钠（Na）、铝（Al）、Fe、Cu、Zn、铅（Pb）、铬（Cr）、镉（Cd）、钛（Ti）、镍（Ni）、钴（Co）、锶（Sr）、钼（Mo）、氯（Cl）、硫（S）依据《多目标区域地球化学调查规范（1:250 000）》（DZ/T0258-2014）（奚小环等，2014）进行测定。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据初步分析与整理，利用 Origin 8.6 软件制图，使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析；采用单因素方差分析（one-way ANOVA）对土壤矿质元素含量进行差异性检验，使用最小显著性差数法（LSD 法）进行多重比较，采用 Pearson 相关性分析法检验不同耕作方式的土壤矿质元素之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对矿质元素 Fe、Ca、Mg、Na、Al、Si 含量的影响

由表 1 可知，与 NM 相比，不同耕作方式的 Si 含量增加了 2.7%~17.5%，且差异显著（P<0.05，下同）；不同耕作方式的 Fe、Mg、Al 含量分别较 NM 显著降低了 12.9%~25.9%、17.2%~42.8%、6.0%~25.8%；除 FM 处理的 Ca 含量较 NM 降低了 47.1%，不同耕作方式的 Ca 含量均增加，均达显著水平，其中 AF 的 Ca 含量增加了 100.9%；对于 Na 而言，不同耕

作方式对其含量影响不显著。由此可见，施肥及覆盖处理促进了 Si 和 Ca 的积累，抑制了 Fe、Mg 和 Al 的积累。

表 1　不同耕作方式的矿质元素 Fe、Ca、Mg、Na、Al、Si 含量

Table1　Fe, Ca, Mg, Na, Al and Si contents in different tillage methods（g•kg^{-1}）

耕作方式 Tillage method	铁 Fe	钙 Ca	镁 Mg	钠 Na	铝 Al	硅 Si
NM	60.62±0.149a	15.08±0.101d	12.59±0.055a	1.69	109.58±0.849a	245.06±0.462e
AF	52.67±0.149b	30.33±0.035a	9.50±0.111c	1.65	103.03±0.798b	251.80±0.412d
OF	44.86±0.148d	21.47±0.101c	10.43±0.014b	1.71	81.27±0.592e	275.77±0.066b
CFP	52.78±0.149b	22.76±0.101b	9.07±0.114d	1.61	98.45±0.762c	256.46±0.066c
FM	48.87±0.317c	7.95±0.055e	7.22±0.111e	1.61	89.35±0.692d	287.93±0.430a

注：**NM**. 无措施；**AF**. 套作绿肥（紫花苜蓿）；**OF**. 施有机肥；**CFP**. 施用化肥与农药；**FM**. 地膜覆盖。不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

Note: **NM**. No measures; **AF**. Alfalfa; **OF**. Organic fertilizer; **CFP**. Chemical fertilizer and pesticides; **FM**. Film mulching. Different lowercase letters indicate significant differences (P <0.05). The same below.

2.2 不同耕作方式对矿质元素 Mn、Cu、Zn、Cd、Cr、Pb 含量的影响

由表 2 可知，与 NM 相比，AF 的 Mn、Pb 分别降低了 10%、7.3%，且达到显著水平，其他 3 种方式的 Mn、Pb 含量均增加，其中 Mn 含量达到显著差异；不同耕作方式均不同程度降低了土壤 Cu、Zn、Cr 含量；除 CFP 处理的 Cd 含量较 NM 显著增加 7.7%外，其他 3 种方式的 Cd 含量分别降低了 28.6%、5%和 41.8%。由此可见，施肥及覆盖处理促进了 Mn 和 Pb 的积累，抑制了 Cu、Zn 和 Cr，且 CFP 增加了重金属 Cd 的含量。

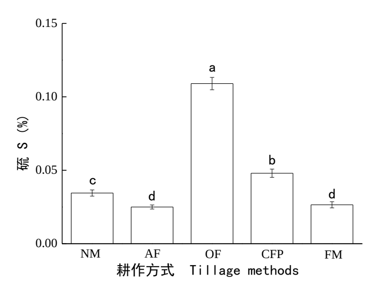
表 2　不同耕作方式的矿质元素 Mn、Cu、Zn、Cd、Cr、Pb 含量

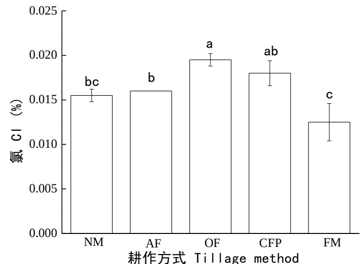
Table2 Mn, Cu, Zn, Cd, Cr and Pb contents in different tillage methods (ug•g^{-1})

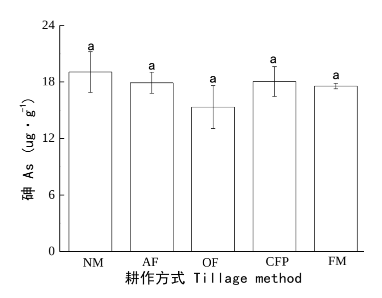
耕作方式 Tillage method	锰 Mn	铜 Cu	锌 Zn	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb
NM	3.03±0.014c	58.03±0.891a	131.10±8.740a	1.96±0.064b	130.40±0.976a	43.12±0.028a
AF	2.66±0.014d	49.14±0.523c	104.12±7.354bc	1.40±0.014c	113.25±0.778b	39.97±0.594b
OF	3.64±0.035a	54.05±0.968b	120.62±9.412ab	1.87±0.014b	91.23±4.419d	45.23±0.594a
CFP	3.57±0.035a	52.76±0.481b	112.92±9.249ab	2.11±0.007a	110.90±1.379b	45.29±1.237a
FM	3.38±0.018b	44.32±0.969d	88.01±7.255c	1.14±0.078d	99.49±3.203c	44.30±2.008a

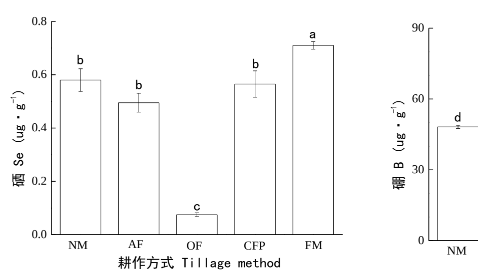
2.3 不同耕作方式对矿质元素 S、Cl、As、Se、B 含量的影响

由图 1 可知，与 NM 相比，不同耕作方式的 S 和 B 含量均达显著差异，其中 OF 的 S 和 B 含量最高，分别增加了 2.16%和 72.7%；FM 和 OF 的 Cl、Se 含量与 NM 差异显著，FM 的 Cl 含量降低，其他 3 种耕作方式的 Cl 含量增加，其中 OF 的 Cl 含量最高；Se 含量受耕作方式影响的变化趋势与 Cl 则相反；不同耕作方式的 As 含量与 NM 差异不显著。上述结果表明，OF 的输入显著提高了 S、Cl 和 B 的含量，但抑制了 Se 的积累。









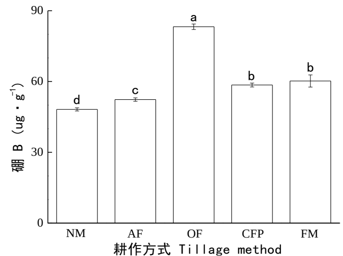


图 1　不同耕作方式的矿质元素 S、Cl、As、Se、B 含量

Fig.1 S, Cl, As, Se and B contents in different tillage methods

2.4 不同耕作方式对矿质元素 Ti、Mo、Ni、Co、Sr 含量的影响

由图 2 可知，与 NM 相比，OF 的 Ti 含量增加，其他 3 种耕作方式的 Ti 含量降低，均达到显著差异；Mo、Sr 的变化趋势相似，与 NM 比较，除 OF 的 Mo、Sr 含量未达显著水平外，其他 3 种方式的 Mo、Sr 含量差异显著；不同耕作方式的 Ni 含量与 NM 相比均显著降低；Co 含量差异不显著。上述结果表明，Co 含量受到不同耕作方式的影响不显著，Ti、Mo、Ni、Sr 的含量均不同程度受影响。

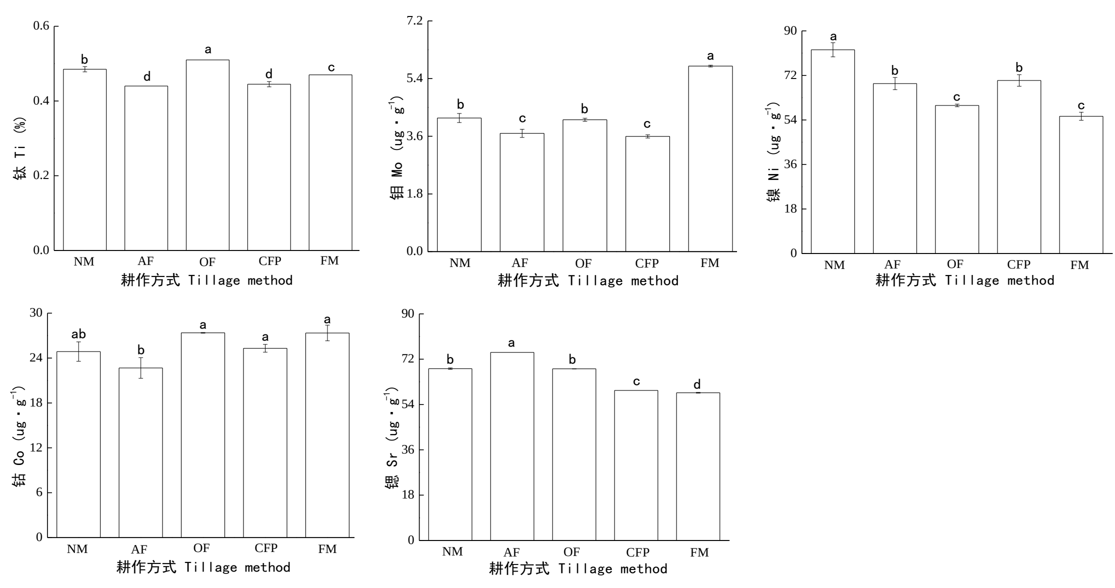


图 2　不同耕作方式的矿质元素 Ti、Mo、Ni、Co、Sr 含量

Fig.2 Ti, Mo, Ni, Co and Sr contents in different tillage methods

2.5 土壤矿质元素间的相关性

由表 3 可知，各矿质元素间的相关关系各异。Al、Si、S、Ni 与其他元素的相关性较密切，其次是 Fe、Mg、Na、Mn、Cu、Co。Fe 与 Al、Ni、Cr 呈极显著正相关（P<0.01，下同），与 As 呈显著正相关（P<0.05，下同），表现为协同作用，与 Si、B 呈显著负相关，表现为抑制作用；Si 与 Mo 呈极显著正相关，与 Co 呈显著正相关，与 Al、Ni、Cr 呈极显著负相关，与 Cu、Mg 呈显著负相关；Al 与 Ni、Cr、Fe 呈极显著正相关，与 As 呈显著正相关，与 Si、B 呈极显著负相关，与 Mn、S、Co 呈显著负相关；Mg 与 Na、Cu、Zn、Ni 呈极显著正相关，与 Cd 呈显著正相关；Na 与 Ti 呈极显著正相关，与 S、Cu、Zn 呈显著正相关，与 Se 呈显著负相关；Mn 与 Co、Pb 呈极显著正相关，且与 Pb 的相关系数达 0.914，与 S、B 呈显著正相关；S 与 B 呈极显著正相关，与 Ti、Cl 呈显著正相关，与 Se 呈极显著负相关关系；Cu 与 Zn、Cd 呈极显著正相关，与 Ni 呈显著正相关；另外，Zn 与 Cd，Ni 与 Cr，Co 与 Pb 间有较好的协同作用；B 与 Cr、Se 间有较强的抑制作用。

表 3 火龙果地土壤矿质元素间相关性

Table3 Correlation among the mineral elements contents in pitaya land

元素 Element	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	Mn	S	Ti	Cl	Cu	Zn	Mo	Ni	As	Cd	Co	Cr	Pb	Se	Sr	B
Fe	1																					
Si	-0.807**	1																				
Al	0.955**	-0.867**	1																			
Ca	-0.032	-0.541	0.190	1																		
Mg	0.585	-0.700*	0.477	0.199	1																	
Na	-0.002	-0.192	-0.110	0.150	0.783**	1																
Mn	-0.548	0.568	-0.705*	-0.366	-0.234	-0.005	1															
S	-0.611	0.294	-0.699*	0.153	0.231	0.642*	0.656*	1														
Ti	-0.298	0.381	-0.515	-0.422	0.392	0.770**	0.451	0.702*	1													
Cl	-0.235	-0.269	-0.212	0.619	0.411	0.501	0.313	0.725*	0.219	1												
Cu	0.493	-0.658*	0.358	0.213	0.927**	0.684*	0.046	0.377	0.365	0.554	1											
Zn	0.423	-0.589	0.283	0.211	0.875**	0.691*	0.020	0.390	0.389	0.532	0.960**	1										
Mo	-0.260	0.766**	-0.376	-0.864**	-0.520	-0.274	0.191	-0.224	0.291	-0.738*	-0.612	-0.556	1									
Ni	0.907**	-0.924**	0.877**	0.223	0.793**	0.260	-0.441	-0.290	-0.171	0.132	0.731*	0.614	-0.567	1								
As	0.666*	-0.457	0.636*	-0.091	0.153	-0.282	-0.434	-0.615	-0.395	-0.347	0.168	0.294	-0.029	0.423	1							
Cd	0.301	-0.539	0.197	0.276	0.641*	0.374	0.365	0.454	0.159	0.678*	0.863**	0.781**	-0.697*	0.577	0.015	1						
Co	-0.543	0.755*	-0.714*	-0.647*	-0.262	0.087	0.790**	0.500	0.641*	0.012	-0.173	-0.205	0.553	-0.519	-0.510	-0.033	1					
Cr	0.985**	-0.847**	0.970**	0.065	0.598	0.018	-0.595	-0.603	-0.333	-0.162	0.482	0.390	-0.326	0.923**	0.597	0.290	-0.595	1				
Pb	-0.352	0.450	-0.520	-0.456	-0.117	0.000	0.914**	0.537	0.441	0.233	0.111	0.033	0.210	-0.246	-0.320	0.373	0.785**	-0.387	1			
Se	0.546	-0.111	0.559	-0.421	-0.333	-0.750*	-0.330	-0.918**	-0.598	-0.784**	-0.387	-0.424	0.392	0.203	0.592	-0.363	-0.227	0.508	-0.174	1		
Sr	0.175	-0.523	0.309	0.673*	0.543	0.599	-0.704*	0.067	0.025	0.312	0.315	0.338	-0.521	0.353	-0.040	-0.009	-0.599	0.258	-0.705*	-0.425	1	
B	-0.862**	0.626	-0.924**	0.016	-0.146	0.407	0.703*	0.912**	0.640*	0.501	-0.005	0.056	0.070	-0.652*	-0.672*	0.116	0.618	-0.867**	0.511	-0.814**	-0.094	1

注：**表示 0.01 水平（双侧）上显著相关；*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

Note: ** means correlation is significant at the 0.01 level; *means correlation is significant at the 0.05 level.

3 讨论

3.1 不同耕作方式的矿质元素变化特征

矿质元素作为作物生长发育所必需的营养成分，与生物分子蛋白、维生素、核酸、生理代谢活动等息息相关，其含量受到海拔（喻阳华等, 2018）、成土母质（杨霖等, 2017）、石漠化发育程度（李艳琼等, 2016）等诸多因素的影响。此外，土壤矿质元素含量还受到人为施加影响（周新斌等, 2010），耕作方式直接作用于土壤，影响土壤结构和养分的转化、运输与循环（Camara et al., 2003）。本研究中，大部分土壤矿质元素含量多随耕作方式而改变，与无措施相比，不同耕作方式的 Ca、Si、Mn 等含量增加，Fe、Mg、Al、Cu、Zn 含量降低。推测火龙果成熟后期对 Fe、Mg、Al、Cu、Zn 的需求量大，因此在栽培过程中应及时添加。

合理的施肥方式亦影响作物产量和品质（魏彬萌等, 2015），施用有机肥促进土壤生化反应，通过影响生物的有效性提高作物对土壤微量元素的吸收、运输和积累（高明等, 2000）。长期施用有机肥可以增加土壤供肥容量，加快腐殖酸对土壤养分的活化速度，从而提高土壤养分含量，保持供应平衡（Huang et al., 2010）。刘赫等（2009）研究表明施用有机肥增加了土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量，本研究结果与之不完全一致，Pb 含量增加，但差异不显著，Cu、Zn、Cd 含量均降低，其中 Cu 差异显著，这可能是作物对土壤矿质元素吸收方式不同所致，也可能与不同植物的选择性吸收有关。付威等（2017）研究施肥对小麦产量的影响，表明施用氮磷化肥可增加土壤养分的含量；王飞等（2012）研究发现单施化肥降低土壤有效态 B、Fe、Zn、Cu 的含量，本文研究结果与之不完全一致，B 含量显著增加，可能是由于火龙果果肉 B 含量降低并向土壤中转移的原因（王彬等, 2015）。但宋先进等（2010）研究表明，有机肥输入的微量元素的数量远大于化肥，这表明在农业生产活动中有机肥优于化肥，且有机肥对土壤的污染较低，而本研究中化肥与农药配施，在对土壤生态效益造成影响的同时，也制约火龙果的品质提升。因此，农业生产活动中施用有机肥更有利于作物生长以及品质形成，这为土壤矿质元素管理提供了理论依据和科学支撑。

干热河谷石漠化区高温干旱、土壤养分贫瘠，地膜覆盖处理可减少地表裸露，降低土壤蒸发，提高水分利用率（付威等, 2017；邓妍等, 2014），促进土壤动物和微生物的活动，利于有机质矿化和分解（毛红玲等, 2010）。覆盖能够调节耕层土壤温度（Awe et al., 2015），且地膜覆盖总体上为增温效果（常磊等, 2018），江肖洁等（2016）研究表明增温能影响土壤 Al、Fe、Mn、Zn 含量。本研究中，地膜覆盖处理的土壤 Al、Fe、Zn 含量降低，Mn 含量升高，可能是由于增温效果与处理方式不同，导致土壤水、热状况，区域微生物数量，有机质矿化及损失率存在差异。

绿肥本身含有微量元素，当其翻压腐解后，由于自身的营养元素归还到土壤，使得土壤表层的矿物养分含量提高。其根系释放大量的有机酸和酶能活化根际微生物的活性，微生物不断吸收利用矿物中的 P、K、Mg 等，利于矿物营养物质释放和有效化（Mclaren, 1984）。霍颖等（2011）研究表明梨园多年种植绿肥可提高土壤的 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 的含量。研究区套种紫花苜蓿，除 Ca 外，Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 的含量均降低，这是因为紫花苜蓿与火龙果之间存在养分竞争，也可能是绿肥种类不同，且种植年限较短，导致腐解速率和养分累积效果的差异。

3.2 土壤矿质元素之间的相关性

探讨土壤矿质元素间的相关关系，可防止由单一元素作为营养指标而带来的误判。徐慧等（2014）研究发现，各种矿质元素之间通过协同调控作用，影响果实的生长发育和品质形成。陈春宏等（1992）研究 Fe、Mn 相互作用及其对植物生理生化的影响表明，Fe 与 Mn 之间存在拮抗作用，本研究结果与之一致。研究区 Fe 与 Al、Ni、Cr 呈极显著正相关，且相关系数均为 0.907 以上，表明土壤中 Fe 能有效活化其他元素。Zn、Mg、Cu 两两之间呈极

显著正相关，且相关系数大于 0.875，说明元素间协同性大，彼此间存在增效作用。土壤 Ca 与 Fe、Mn，Mn 与 Fe、Mg、Cu、Zn，B 与 Fe、Mg、Cu 均呈负相关关系，表明矿质元素间存在此消彼长的特征。

4 结论

（1）5 种耕作方式相比，施有机肥的矿质元素补给最为丰富，施用化肥与农药次之，地膜覆盖居中，套种紫花苜蓿最次。

（2）与无措施相比，其他耕作方式的 Ca、Si、Mn 等含量均不同程度增加，Fe、Mg、Al 等含量降低，Na 含量无显著差异。在火龙果栽培时，应向土壤添加 Fe、Mg、Al、Na 等矿质元素，促进其生长发育，提高产量和品质。

（3）矿质元素之间表现出一定程度的相关性，存在增强或抑制效应，尤以 Al、Si、S、Ni 等元素与其他元素的关系较密切。

参考文献：

AWE GO, REJCHERT JM, WENDROTH OO, 2015. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in Southern Brazil [J]. Soil Till Res, 150:93-106.

BRENNAN EB, BOYD NS, SMITH RF, et al., 2011. Comparison of rye and legume-rye cover crop mixtures for vegetable production in California [J]. Agron J, 103(2):449-463.

CAMARA KM, PAYNE WA, RASMUSSEN PE, 2003. Long-term effects of tillage, nitrogen, and rainfall on winter wheat yields in the Pacific Northwest [J]. Agron J, 95: 828-835

CAO YQ, YAO XH, REN HD, et al., 2015. Changes in contents of endogenous hormones and main mineral elements in oil-tea camellia fruit during maturation [J]. J Beijing For Univ, 37 (11):76-81. [曹永庆，姚小华，任华东，等, 2015 .油茶果实成熟过程中内源激素和矿质元素含量的变化特征[J]. 北京林业大学学报, 37(11):76-81.]

CHANG L, HAN FX, CHAI YW, et al., 2018. Effect of bundled straw mulching on soil temperature and yield formation of winter wheat in rain-fed semiarid region [J]. Chin J Appl Ecol, 29(9):2949-2958. [常磊，韩凡香，柴雨葳，等, 2018. 秸秆带状覆盖对半干旱雨养区冬小麦田地温和产量的影响[J]. 应用生态学报, 29(9):2949-2958.]

CHEN CH, ZHANG YD, ZHANG CL, et al., 1992. Effects of Fe, Mn interaction plant physiology and biochemistry interaction [J]. Plant Fert, (6):9-12. [陈春宏，张耀栋，张春兰，等, 1992. 铁、锰相互作用及其对植物生理生化的影响[J]. 土壤肥料, (6):9-12.]

DENG Y, GAO ZQ, SUN M, et al., 2014. Effects of deep plowing and mulch in fallow period on soil water and yield of wheat in dryland [J]. Chin J Appl Ecol, 25(1): 132 -138.[邓妍，高志强，孙敏，等，2014. 夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J]. 应用生态学报, 25(1):132-138.]

FU W, FAN J, HU YT, et al., 2017. Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau [J]. J Plant Nutr Fert Sci, 23(5): 1158–1167. [付威，樊军，胡雨彤，等, 2017. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 23(5):1158-1167.]

GAO M，CHE FC，WEI CF et al., 2000. Effect of longterm application of manures on forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil [J]. J Plant Nutr Fert Sci, 6(1):11-17. [高明，车福才，魏朝富，等，2000.长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 6(1): 11-17.]

HUANG S, RUI WY, PENG XX, et al., 2010. Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil [J]. Nutr Cycl Agro, 86(1): 153-160.

HUANG X, YAO D, LU AY, et al., 2018. Correlation analysis on fruit quality of *Eriobotrya japonica* ‘Baiyu’from different locations in Jiangsu Province with mineral element contents in fruit and soil [J]. J Plant Resour Environ, 27(2):85-92.[黄霄，姚丹，陆爱华，等，2018. 江苏不同产地‘白玉’枇杷果实品质与果实和土壤中矿质元素含量的相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 27(2):85-92.]

HUO Y, ZHANG J, WANG MC, et al., 2011. Effects of inter-row planting grasses on variations and relationships of soil organic matter and soil nutrients in pear orchard [J]. Sci Agric Sin, 44(7):1415-1424.[霍颖，张杰，王美超，等，2011. 梨园行间种草对土壤有机质和矿质元素变化及相互关系的影响[J]. 中国农业科学, 44(7):1415-1424.]

JIANG XJ, CENG CN, HAN JQ, et al., 2016. Effects of warming on mineral element contents in leaves of dominant species and in soils in Changbai Mountain tundra [J]. Acta Ecol Sin, 36(7):1928-1935.[江肖洁，耿春女，韩建秋，等，2016. 增温对长白山苔原植物叶片和土壤矿质元素含量的影响[J]. 生态学报, 36(7):1928-1935.]

LI YJ, WANG H, ZHAO JL, et al., 2015. Effects of tillage methods on soil physicochemical properties and biological characteristics in farmland [J]. Chin J Appl Ecol, 26(3):939-948.[李玉洁，王慧，赵建宁，等，2015. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 26(3):939-948.]

LI YM, CHEN QB, LIANG M, et al., 2016. Effect of disturbance of hydropower construction on soil nutrients and microorganisms in dry-hot river valley [J]. J Soil Water Conserv, 30(1):147-152.[李艳梅，陈奇伯，梁茂，等，2016.干热河谷水电建设干扰对表土层土壤养分及微生物的影响[J]. 水土保持学报, 30(1):147-152.]

LI YQ, DENG XW, YI CY, et al., 2016. Plant and soil nutrient characteristics in the karst shrub ecosystem of Southwest Hunan [J]. Chin J Appl Ecol, 27(4):1015-1023.[李艳琼,邓湘雯，易昌雯，等，2016. 湘西南喀斯特地区灌丛生态系统植物和土壤养分特征[J]. 应用生态学报, 27(4):1015-1023.]

LIU H, LI SY, WANG JH, 2009. Effects of long-term application of organic manure on accumulation of main heavy metals in brown earthl[J]. Ecol Environ Sci, 18(6):2177-2182.[刘赫，李双异，汪景宽，2009. 长期施用有机肥对棕壤中主要重金属积累的影响[J]. 生态环境学报, 18(6): 2177-2182.]

LIU QL, HAO YY, HAO GW, et al., 2015. Effects of spraying selemium on the mineral elements content and the storage properties of the pear fruits [J]. Plant Physiol J, 51(5):655-660.[刘群龙，郝燕燕，郝国伟，等，2015. 叶面喷硒对梨果实矿质元素积累和贮藏特性的影响[J]. 植物生理学报, 51(5):655-660.]

LYMAN B, 1982. The cacti of the United States and Canada [M]. Stanford: Stanford University Press.

MAO HL, LI J, JIA ZK, et al., 2010. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 26(8):44-51.[毛红玲，李军，贾志宽，等，2010. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. 农业工程学报, 26(8):44–51.]

MAO QG, LU XK, CHEN H, et al., 2015. Responses of terrestrial plant diversity to elevated mineral element inputs [J]. Aeta Ecol Sin, 35(17):5884-5897.[毛庆功，鲁显楷，陈浩,等, 2015. 陆地生态系统植物多样性对矿质元素输入的响应[J]. 生态学报,

35(17):5884-5897.]

MCLAREN AD, 1984. Soil biochemistry [M]. MIN JW (Translation). Beijing: Agricultural Press. [MCLAREN AD, 1984. 土壤生物化学[M]. 闵九康(译). 北京:农业出版社.]

PAN HF, XU YL, ZHANG Y, et al., 2011. Effects of boron on the growth and fruit quality of Dangshansu pear (*Pyrus bretshneideri* cv. Dangshansu pear) [J]. J Plant Nutr Fert, 17(4):1024-1029.[潘海发, 徐义流, 张怡, 等, 2011. 硼对砀山酥梨营养生长和果实品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 17(4):1024-1029.]

QIN HL, GAO WS, MA YC, et al., 2007. Effects of no-tillage on soil properties affecting wind erosion during fallow in Ectone of North China [J]. Acta Ecol Sin, 27(9):3778-3784.[秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等, 2007. 免耕对农牧交错带农田休闲期土壤风蚀及其相关土壤理化性状的影响[J]. 生态学报, 27(9):3778-3784.]

REN TX, MOU XZ, ZHANG H, et al., 2006. DZ/T0167-2006 Specifications for regional geochemistry exploration [S]. Beijing: China Standard Press. [任天祥, 牟绪赞, 张华, 等, 2006. DZ/T0167-2006 区域地球化学勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社.]

SONG SH, LIU Q, LI M, et al., 2016. Correlation and path analysis between mineral elements and quality pa-rameters in non-astringent persimmon [J]. J Fruit Sci, 33(2):202-209.[宋少华, 刘勤, 李曼, 等, 2016.甜柿果实矿质元素与品质指标的相关性及通径分析[J]. 果树学报, 33(2):202-209.]

SONG XJ, MA Q, ZHOU H, et al., 2010. Effects of different fertilization modes on the budget sand recycling rates of trace elements in agroecosystems [J]. Chin J Ecol, 29(3):491-497.[宋先进, 马强, 周桦, 等, 2010. 不同施肥处理对农田生态系统微量元素收支及循环率的影响[J]. 生态学杂志, 29(3):491-497.]

SUN M, LIU Y, LI BG, et al., 2017. Ecological effects of within-row mulching on soil microsites in walnut orchards [J]. Acta Ecol Sin, 37(13):4434-4443.[孙萌, 刘洋, 李保国, 等, 2017. 核桃园行内覆盖的土壤微域生态效应[J]. 生态学报, 37(13):4434-4443.]

TENORE GC, NOVELLION E, BASILE A, 2012. Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) ex-tracts[J]. J Funct Foods, 4(1):129-136.

WANG B, ZHENG W, CAI YQ, 2015. Changes of nutrition element content in the fruit of pitaya fruit during development [J]. Chin J Trop Crop, 36(7):1242-1246.[王彬, 郑伟, 蔡永强, 2015. 火龙果果实发育期间营养元素含量的变化[J]. 热带作物学报, 36(7):1242-1246.]

WANG F, LIN C, LI QH, et al., 2012. Effects of long-term fertilization on contents of Zn, B, Cu, Fe and Mn in rice grain and soil in yellow paddy fields of southern China [J]. Plant Nutr Fert Sci, 18(5):1056-1063.[王飞, 林诚, 李清华, 等, 2012. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒与土壤锌、硼、铜、铁、锰含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 18(5):1056-1063.]

WEI BM, WANG YQ, SHI ZL, et al., 2015. Calcium degradation status of orchard soil in Weibei Region, Shaanxi Province [J]. Sci Agric Sin, 48(11):2199-2207.[魏彬萌, 王益权, 石宗琳, 等, 2015. 渭北苹果园土壤钙素退化状态[J]. 中国农业科学, 48(11):2199-2207.]

XI XH, REN TX, CHEN GG, et al., 2014. DZ/T0258-2014 Specifications for regional geochemistry exploration(1:250 000) [S]. Beijing: China Standard Press. [奚小环, 任天祥, 陈国光, 等, 2014. DZ/T0258-2014 区域地球化学调查规范(1:250 000)[S]. 北京:中国标准出版社.]

XIONG ZT, CENG B ,2006. Phytotoxic effects of cooper on nitrogen metabolism and plant growth in *Brassica pekinensis* Rupr [J]. Ecotoxicol Environ Safety, 64(3):273-280.

XU H, CHEN XX, WANG YZ, et al., 2014. Correlation and path analysis between mineral element and quality indicators of ‘Fuji’ apple fruits [J]. Chin Agric Sci Bull, 30(25): 116-121.

[徐慧，陈欣欣，王永章，等，2014.‘富士’苹果果实矿质元素与品质指标的相关性与通径分析[J]. 中国农学通报, 30(25):116-121.]

YAN BG, HE GX, SHI LT, et al., 2016. Element concentration in leaves and nutrient resorption efficiency on dry-red soil and verti-sols in dry and hot valley in Yuanmou, China [J]. Chin J Appl Ecol, 27(4):1039-1045.[闫帮国，何光雄，史亮涛，等, 2016. 元谋干热河谷燥红土和变性土上植物叶片的元素含量及其重吸收效率[J]. 应用生态学报, 27(4):1039-1045.]

YANG DF, LIN QH, XIE HG, et al., 2012. The variation of main nutrient element contents in the fruit of pitaya during the development under saline conditions [J]. Chin J Trop Crop, 33(11):1954-1959.[杨道富，林旗华，谢鸿根，等，2012. 盐碱环境下火龙果生长过程中果实主要营养元素含量变化[J]. 热带作物学报, 33(11):1954-1959.]

YANG L, YANG C, ZHU TB, et al., 2017. Contents and availability of trace elements in soils of natural forests in Karst region [J]. Carsol Sin, 37(1):59-66.[杨霖，杨程，朱同彬,等, 2017. 岩溶区原始林土壤微量元素含量与有效特征[J]. 中国岩溶, 37(1):59-66.]

YU YH, QIN SY, ZHONG XP. 2018. The mother roch's chemical composition and element contents of the Chinese prickly ash in the Karst dry and hot valley as the altitude changes [J]. J Guizhou Univ (Nat Sci Ed), 36(2):9-14.[喻阳华，秦仕忆，钟欣平, 2018. 喀斯特干热河谷花椒林母岩化学组成与元素含量随海拔的分异[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 36(2):9-14.]

YUE XW, PAN ZX, SHI LT, et al., 2016. Characteristics of soil nutrients in typical shrub communities in arid-hot valley of Jinsha River [J]. SW China J Agric Sci, 29(11):2665-2668.[岳学文，潘志贤，史亮涛，等，2016. 金沙江干热河谷典型灌木群落的土壤养分特征[J]. 西南农业学报, 29(11):2665-2668.]

ZHOU XB, SHI XJ, SUN PS, et al., 2010. Status of soil fertility in citrus orchards of Chongqing Sanxia Reservoir Area [J]. Plant Nutr Fert Sci, 16(4):817-823.[周新斌，石孝均，孙彭寿,等, 2010. 三峡重庆库区柑橘园土壤养分丰缺状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 16(4):817-823.]